



O efeito não mitigador da DEF em concretos submetidos a temperatura de 80°C por meio de pozolanas como a sílica ativa e o metacaulim

The non-mitigating effect of DEF in concretes submitted to a temperature of 80°C by pozzolans such as silica fume and metakaolin

OLIVEIRA, S. (1); HASPARYK, N. P. (1); OLIVEIRA, A. M. (2); KUPERMAN, S.C. (3)

(1) ELETROBRAS Furnas; (2) UFG; (3) DESEK

Resumo

Atualmente tem sido detectado o lançamento de volumes expressivos de concreto em elementos estruturais sem a preocupação com a temperatura atingida no interior da sua massa nas primeiras idades. Esse fato é extremamente preocupante haja vista que o importante avanço dos estudos atuais relacionados ao tema bem como casos reais que vem sendo diagnosticados tem mostrado os graves riscos do desencadeamento da formação da etringita tardia (DEF-Delayed Ettringite Formation) e o elevado nível de deterioração que esse fenômeno pode gerar. A DEF trata-se de uma formação tardia do composto etringita, que é expansivo, gera tensões internas ao concreto e leva o compósito e o elemento estrutural à deterioração bastante precoce, com queda das propriedades mecânicas, reflexos na rigidez bem como perda de integridade. Esse fenômeno tem sido diagnosticado atualmente e frequentemente no Brasil em variadas obras, e em idades jovens. Temperaturas, em geral, acima de 60-65°C têm sido apontadas como arriscadas para potencializar esse fenômeno expansivo deletério. A prevenção já é bem consolidada pelo conhecimento técnico sobre os cuidados na definição do melhor tipo de concreto, sua produção e lançamento. Ainda, quando não é possível manter a temperatura abaixo dos limites, os procedimentos de pré/pós refrigeração devem ser adotados. Diante do exposto, esse trabalho apresenta o comportamento expansivo de concretos contendo sílica ativa (8 e 12%) e metacaulim (12 e 14%), após submetidos a alta temperatura (80°C). Os concretos foram avaliados até 365 dias por meio do monitoramento de prismas e expansões. Inspeções visuais bem como ensaios de ultrassom (US) foram realizados, além de análises microestruturais para confirmar a incidência de produtos decorrentes do fenômeno expansivo da DEF. Os resultados mostraram que as misturas com adições levam mais tempo para desenvolver as expansões, promovendo retardo da DEF, porém. As análises visuais, microestruturais e por US sinalizaram a presença da etringita tardia e a deterioração de todos os concretos. Como principais conclusões, as adições incorporadas, nos teores testados, não mitigaram a DEF.

Palavra-Chave: Concretos, DEF, Expansão, Pozolanas, Mitigação.

Abstract

It has been detected the release of significant volumes of concrete in various structural elements without concern for the temperature that can be reached within its mass at early ages. This fact is extremely worrying because the important advance of current studies related to the subject as well as real cases that have been diagnosed have shown the serious risks of triggering the formation of late ettringite (DEF-Delayed Ettringite Formation) and the important level of deterioration that this phenomenon can generate. The DEF is a delayed formation of the ettringite compound, which is expansive, generates internal stresses to the concrete and leads the composite and the structural element to deterioration very early, with a decline in mechanical properties, reflections in the stiffness as well as loss of integrity. This phenomenon has been diagnosed currently and frequently in Brazil in various works, and at young ages. Temperatures, in general, above 60-65°C have been pointed out as risky for potentiating this deleterious expansive phenomenon. The prevention for this problem is already well consolidated by technical knowledge about the care in defining the best type of concrete, its production and launching. Still, when it is not possible to keep the temperature below the limits, the pre/post cooling procedures must be adopted. Given the above, this work presents the expansive behavior of concrete containing silica fume (8 and 12%) and metakaolin (12 and 14%), after being subjected to high temperature (80° C). The concretes were evaluated up to 365 days by monitoring prisms and expansions. Visual inspections as well as ultrasound (US) tests were conducted, in addition to microstructural analyzes to confirm the incidence of products resulting from the expansive phenomenon of DEF. The results showed the mixtures with pozzolans take longer to develop the expansions, promoting a DEF delay. Visual, microstructural and US analyzes signaled the DEF and the deterioration of all concretes. As the main conclusions, the admixtures incorporated, at the tested levels, did not mitigate the DEF.

Keywords: concretes, DEF, Expansion, pozzolanas, mitigation.



1 Introdução

Por falta de conhecimento técnico, ou simplesmente negligência técnica, tem sido detectado o lançamento de volumes expressivos de concreto em variados elementos estruturais sem a preocupação com a temperatura que pode ser atingida no interior da sua massa nas primeiras idades. Esse fato é extremamente preocupante haja vista o avanço dos estudos atuais relacionados ao tema, associado aos casos reais que vem sendo diagnosticados tem mostrado os graves riscos do desencadeamento da formação da etringita tardia (DEF-Delayed Ettringite Formation) e o elevado nível de deterioração que esse fenômeno pode gerar.

A formação tardia do composto etringita expansivo gera tensões internas ao concreto e leva o compósito e o elemento estrutural à deterioração bastante precoce, com queda das propriedades mecânicas, reflexos na rigidez bem como perda de integridade. Esse fenômeno tem sido diagnosticado atualmente e frequentemente no Brasil em variadas obras em idades jovens. A DEF deletéria é proveniente de um ataque químico interno por sulfatos, onde a fonte de íons é proveniente dos compostos presentes no próprio cimento. Este fenômeno ocorre quando durante o processo de cura os compósitos cimentícios são expostos tanto a elevadas temperaturas (acima de 65°-65°C, embora ainda não exista um consenso na literatura) como a altas umidades (HASPARYK; KUPERMAN, 2019; SCHOVANZ, 2019; BRONHOLO, 2020; LANGOSKI et al., 2020; HASPARYK; KUPERMAN, 2021).

Esse fenômeno pode ocorrer pelo elevado calor de hidratação gerado pelos cimentos devido às reações exotérmicas, em elementos maciços, por exemplo, como em blocos de fundação (MELO et al., 2010, 2011; MARTIN; TOUTLEMONDE, 2013; TORRES; ANDRADE, 2016; HASPARYK; KUPERMAN, 2019). Outra forma de ocorrência da DEF é a exposição das peças estruturais de concreto a ciclos térmicos, como ocorre na fabricação de pré-moldados de concreto. Os elementos estruturais são submetidos a tratamentos térmicos, quando nas primeiras horas do processo de hidratação, as temperaturas podem atingir patamares bastante elevados, geralmente acima de 70°C, curados em umidade e pode ocorrer a formação de etringita tardia. Algumas pesquisas têm induzido a DEF em laboratório por meio da aplicação de ciclos térmicos e curas úmidas, em argamassas e concretos, simulando situações semelhantes àquelas das indústrias de pré-moldados (LEKLOU; NGUYEN; MOUNANGA, 2016; MARTIN et al., 2016; RASHIDI et al., 2017; BRONHOLO, 2020; LANGOSKI et al., 2020; HASPARYK et al., 2022).

A prevenção para esse problema já é bem consolidada pelo conhecimento técnico sobre os cuidados na definição do melhor tipo de concreto, sua produção e lançamento. Ainda, quando não é possível manter a temperatura abaixo dos limites, os procedimentos de pré/pós refrigeração devem ser adotados. Tudo isso necessita de uma avaliação inicial com a predição do desenvolvimento das temperaturas internas, a partir de análises térmicas. Entretanto, muitos construtores insistem em fazer uso de adições minerais pozolânicas como mitigadores da DEF ao invés de se preocuparem em limitar as temperaturas do concreto.



As adições pozolânicas, como a sílica ativa e o metacaulim, por exemplo, apresentam um papel importante no comportamento mecânico e desempenho do concreto e, muitas vezes, auxiliam no combate de alguns fenômenos como a reação álcali-agregado, porém no caso da DEF a experiência mostra que isso nem sempre ocorre.

Diante do exposto, esse trabalho apresenta resultados de um estudo experimental desenvolvido em laboratório, com base em uma dosagem comum, empregada na construção civil, com CP-V-ARI, além de mais 4 misturas que contemplaram a sílica ativa e o metacaulim, em 2 teores cada. Uma avaliação do potencial de expansão frente à possibilidade de ocorrência da DEF, bem como ensaios mecânicos, ultrassom e análises microestruturais foram executados de forma a esclarecer o que tem ocorrido muitas vezes em campo, sem a aplicação das devidas ações preventivas, e muitas vezes não é explicado em laboratório. Esse trabalho fez parte de um estudo maior, desenvolvido por FURNAS, por meio de projeto de P&D ANEEL.

2 Programa experimental

2.1 Materiais e Concretos

O cimento utilizado na pesquisa foi do tipo CPV-ARI e as adições empregadas foram a sílica ativa e metacaulim. Os principais parâmetros químicos do cimento são: $\text{SiO}_2=18,74\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3=4,19\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3=2,79\%$; $\text{CaO}=62,49\%$; $\text{MgO}=1\%$; $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=0,73\%$; $\text{SO}_3=3,29\%$. A sílica ativa contém $95,21\%$ de SiO_2 ; $1,01\%$ de K_2O ; $0,45\%$ de CaO ; $0,22\%$ de Al_2O_3 ; $0,47\%$ de MgO e $0,18\%$ de Fe_2O_3 . Já o metacaulim possui $57,30\%$ de SiO_2 ; $31,92\%$ de Al_2O_3 ; $2,52\%$ de Fe_2O_3 , $1,63\%$ de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ e $0,68\%$ de MgO .

Os agregados gráudo e miúdo empregados no estudo são de natureza granítica, provenientes do estado de Goiás e classificados como potencialmente inócuos para a reação álcali-sílica (RAS), conforme a NBR 15577-1 (ABNT, 2018). O agregado gráudo e miúdo possuíram dimensão máxima característica de 19 mm e 4,8 mm, respectivamente.

Os concretos produzidos foram semelhantes aos apresentados por Bronholo (2020), tendo como diferencial o uso das adições minerais e o emprego de areia artificial. O traço de referência foi de 1:1,74:1,80, com consumo de cimento de 463 kg/m^3 e relação água/ligante de 0,46.

As misturas foram binárias com o cimento Portland tipo CP V ARI, sendo testados o metacaulim (substituição parcial ao cimento, em volume: 12 e 14%) e a sílica ativa (teores de 8 e 12%). Os concretos tiveram a definição da faixa de $200 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ para o abatimento, conforme consistência para concreto bombeável da classe S160 (ABNT NBR 8953, 2015). Foi usado um aditivo plastificante polifuncional para a garantia da trabalhabilidade.



2.2 Procedimentos para indução da DEF e avaliações realizadas

A cura das argamassas e dos concretos foi realizada de acordo com o disposto em Hasparyk, Schovanz e Kuperman (2020), que trata de uma Instrução Técnica intitulada “Método de Ensaio para a avaliação do Potencial de Ocorrência da Etringita Tardia (DEF) em Concreto”. A única diferença foi que no presente estudo, a temperatura máxima atingida foi reduzida para 80°C. Para a avaliação do potencial de expansão da DEF foram empregados corpos de prova prismáticos, com dimensões de 75 mm x 75 mm x 285 mm, sendo acompanhada a variação de comprimento por meio de relógio comparador.

A resistência à compressão e o ensaio de ultrassom foram executados em corpos de prova cilíndricos, de 5 x 10 cm, bem como análises visuais e por microscopia eletrônica de varredura. O ensaio de resistência à compressão foi executado em prensa servo-controlada (EMIC, DL100T), de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2018). Os ensaios de ultrassom seguiram a ABNT NBR 8802 (2019), com equipamento específico de ultrassom da marca Proceq, modelo Pudint Lab. Sabe-se que a velocidade ultrassônica obtida pode servir como indicador do nível de qualidade do concreto, integridade e deterioração. O tempo de percurso de pulso ultrassônico varia e é reduzido na presença de microfissurações, refletindo em menores valores de velocidade de propagação das ondas por ultrassom.

As análises microestruturais foram empregadas usando-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV) do Laboratório de Microestrutura da Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil e Hidráulica de FURNAS (DTEC.E), da marca Tescan, modelo VEGA3, de vácuo variável, com sistema duplo de EDS da Oxford Instruments. Para realização das microanálises foi utilizado o detector de Energia Dispersiva de raios X (EDS - Energy Dispersive X Ray Spectroscopy) acoplado ao MEV para a identificação dos elementos químicos presentes de forma rápida e simultânea à observação das imagens.

3 Apresentação e discussão dos resultados

3.1 Avaliação do Potencial Expansivo

As expansões monitoradas ao longo do tempo estão apresentadas na Figura 1.

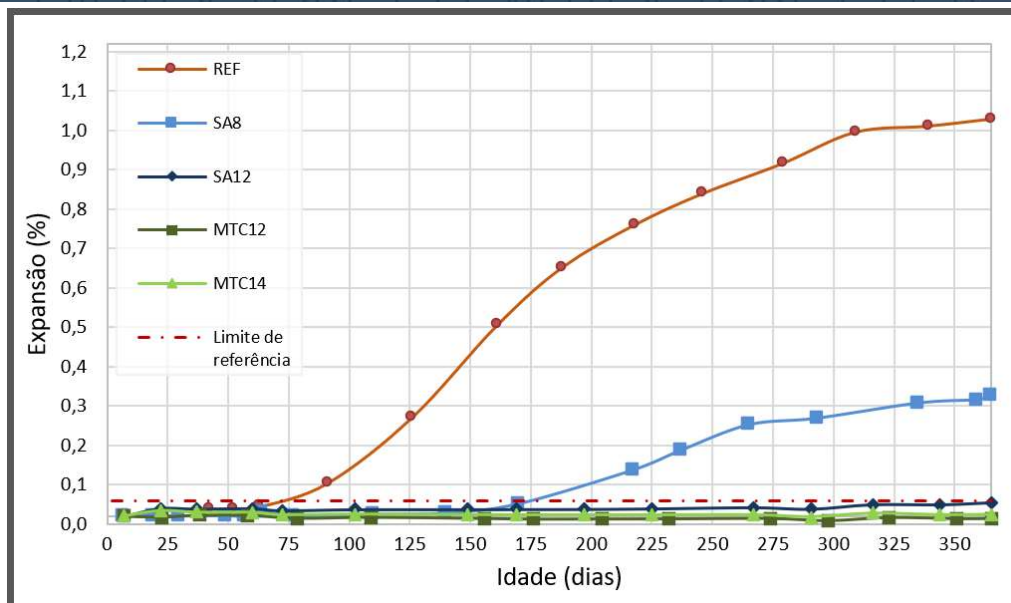


Figura 1 - Expansões por DEF ao longo do tempo.

Os resultados apresentados na Figura 1 mostram que as misturas de referência (sem adição) e com adição de 8% de sílica ativa foram as que sofreram expansões bem mais expressivas quando comparadas com as demais, empregando-se entre 12 e 14% de pozolana.

A partir de uma análise ao longo do tempo, iniciando por 28 dias, tem-se registrados os seguintes valores de expansão para os 5 concretos: REF (0,02%), SA8 (0%) e SA12, MTC12 e MTC14 (0%). Após 63 dias de ensaio, para a REF, sem adição, foi iniciado o processo expansivo que não cessou ao longo do tempo e, aos 365 dias, a expansão atingiu patamar extremamente elevado, de 1,01%. O concreto SA8, embora com certo atraso para o início das expansões, na idade de 170 dias atinge aceleração do processo expansivo, chegando a 0,30% com 365 dias de idade.

Não foram identificados estudos publicados sobre DEF no Brasil com as adições mencionadas, sendo essa pesquisa inédita no âmbito laboratorial. Tendo como referência os resultados apresentados por Schovanz (2019), foi observado na idade final de seu estudo (9 meses) expansões de 1% e 0,20%, para os cimentos Portland CP V-ARI e CP IV, respectivamente, se assemelhando aos valores obtidos e apresentados neste trabalho com o CP V (REF.) e a sílica ativa (SA8). Já nos estudos de Bronholo (2020) as taxas de expansão na idade de 1 ano foram menores, e de 0,37% e 0,02% para o CP V-ARI e um CP IV. Destaca-se que Schovanz (2019) empregou o método Brasileiro (Hasparyk *et al.*, 2020), com as amostras em imersão em água durante o ciclo térmico, enquanto Bronholo (2020) usou uma câmara climática (sem imersão).

Por outro lado, no estudo de Silva, Ribeiro e Divet (2022) as adições minerais pozolânicas testadas pelos pesquisadores se apresentaram promissoras na redução das expansões ao longo do tempo. Porém, com o estudo continuado e até 8 anos, mesmo o metacaulim (teor de 15%) sinalizou altas expansões (0,05%). Este comportamento demonstra que ocorreu apenas um retardo inicial no desenvolvimento das expansões pela DEF. No presente estudo a idade final de avaliação foi de 365 dias, devendo-se, portanto ser realizado um estudo de maior duração para efeitos comparativos.

Os demais concretos e suas respectivas expansões na idade de 365 dias (entre parêntesis), SA12 (0,03%), MTC12 e MTC14 (0%), mantiveram durante todo o estudo valores abaixo de 0,04%, conforme limite sugerido em Hasparyk et al. (2020). Os concretos com metacaulim, até a idade avaliada, não produziram expansões. Porém, conforme mencionado anteriormente e recomendado, na presença de adições no estudo de mitigação, as expansões devem ser monitoradas até 2 anos. Ou seja, no presente momento não se pode afirmar nem extrapolar o comportamento para essa idade haja vista que a DEF possui comportamento sigmoidal, conforme Portella *et al.* (2021).

3.2 Avaliação do Comportamento Mecânico

A partir dos dados de referência da resistência à compressão obtidos na idade de 90 dias, idade que já contempla um maior desenvolvimento das resistências em decorrência do emprego das adições pozolânicas, foi observada queda desta propriedade quando as misturas foram avaliadas aos 365 dias, conforme Figura 2. O comportamento mencionado ocorreu especialmente para a REF e para os concretos confeccionados com a sílica ativa (SA8 e SA12), com quedas de 44%, 34% e 20%, respectivamente. Já os concretos com metacaulim, e até a idade avaliada (1 ano), não demonstraram queda no presente estudo. Sabe-se que, em geral, quedas na compressão não são comuns quando da ocorrência de reações expansivas, como a RAA, por exemplo, sendo o módulo o mais afetado (Hasparyk, 2005). Já nesse estudo da DEF, as reduções foram expressivas e indicam a severidade desse tipo de ataque.

Vale destacar novamente que para avaliar adições na mitigação da DEF, conforme Hasparyk et al. (2020), os ensaios de expansão devem ser conduzidos até a idade de 2 anos, entendendo-se que o mesmo deva ser feito com as propriedades mecânicas.

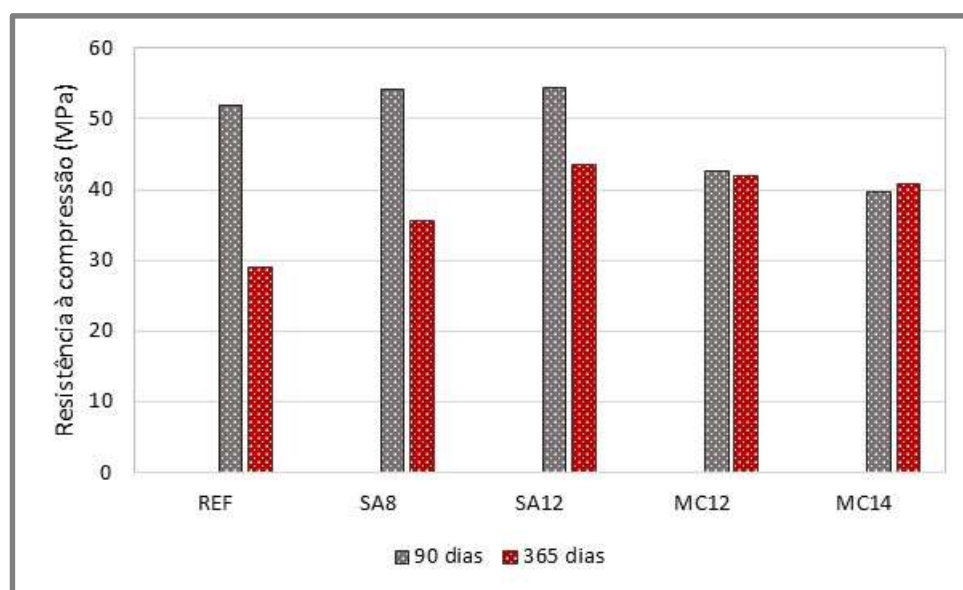


Figura 2 – Comportamento da resistência à compressão entre 3 e 12 meses.

3.3 Avaliação da Velocidade Ultrassônica

A Figura 3 registra os dados de velocidade de propagação de ondas determinados a partir do ensaio por ultrassom ao longo do tempo, e até 12 meses. As misturas de referência e aquela com 8% de sílica ativa apresentaram comportamentos semelhantes, com redução gradativa da velocidade ultrassônica a partir de 2 meses, e com o avanço do tempo. A partir dos picos de velocidade para cada amostra, as perdas foram mais expressivas para essas amostras, com redução de até 11%, o que representa significativa diferença nesse parâmetro, e em torno de 500 m/s. Para as demais amostras existem reduções ao longo do tempo, porém, de menor intensidade e abaixo de 2,5% com diferenças que não ultrapassaram 120 m/s. O MC14 foi o concreto que apresentou menores prejuízos ao longo do tempo e até 1 ano para esse parâmetro, seguido pela SA12.

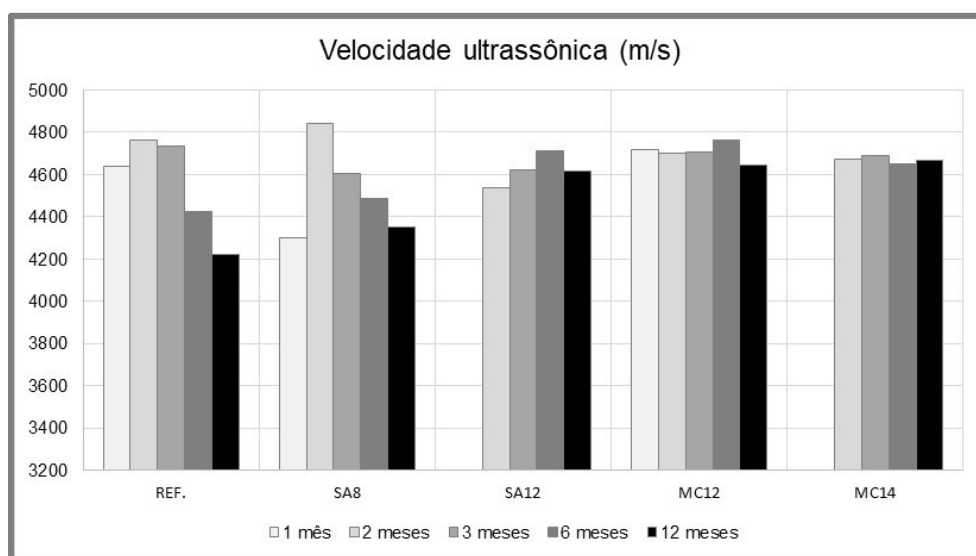


Figura 3 – Velocidade de propagação de ondas ao longo do tempo.

Estudos anteriores já sinalizavam a sensibilidade dessa técnica de ultrassom na investigação de testemunhos de concreto extraídos de elementos de concretos acometidos por reações expansivas (Hasparyk, 2005), como a reação álcali-sílica (RAS). No presente estudo, comportamento similar foi verificado, embora os concretos testados contenham adições e, nos maiores teores empregados, o efeito maléfico da DEF pode estar defasado / atrasado em termos da intensificação da produção de fases neoformadas geradoras de expansão e fissuração. Isso pode ser visto com base nas expansões (ver item 3.1) e nas análises microestruturais apresentadas na sequência (item 3.4).

3.4 Avaliação Visual e Microscópica

Na Figura 4 encontram-se registradas as neoformações observadas durante as inspeções visuais e que se relacionam com os produtos que foram neoformados ao longo do tempo no interior dos concretos. Na sua maioria, são observadas deposições brancas nos poros, nas zonas de transição, bem como dispersas na pasta, além de algumas fissuras. Todas as amostras avaliadas, sem ou com as adições, nos teores estudados, mostraram a presença dessas feições.

A única diferença é o proporcionamento/distribuição dos produtos formados. Enquanto na amostra REF, há uma incidência expressiva, nas amostras com as adições, e nos maiores teores empregados (SA12 e MC14), a concentração parece menor.



Figura 4 – Feições observadas por inspeção visual na porção interna dos concretos.

Nas Figuras de 5 a 12 são registradas algumas micrografias e espectros característicos das principais fases observadas pelo MEV/EDS. Notou-se a maior incidência das neoformações nas amostras de REF., SA8 e MC12. Entretanto, fases sulfatadas também foram observadas nas análises microestruturais realizadas nas demais amostras (SA12 e MC14). Entre elas destacam-se principalmente os poros com essas formações no seu interior. Porém, a zona de transição (ZT) interfacial entre a pasta e os agregados (Ag.) também indicou cristais de etringita neoformados e algumas vezes acompanhados de perda de aderência.

Formações massivas ainda foram observadas, mesmo nas amostras com as adições, além de pulverulência (Pulv.) e fragilização da matriz. Interessante comentar que nas amostras SA12 e MC 14, as formações se apresentavam, na sua maioria, na forma de acículas, quando comparadas com as formas comprimidas. Entre a SA12 e o MC14, essa última mistura foi a que apresentou fases neoformadas de forma menos expressiva. Os resultados observados por MEV corroboram as inspeções visuais e expansões atingidas pelos concretos avaliados. Todas essas feições podem ser observadas nas micrografias a seguir.

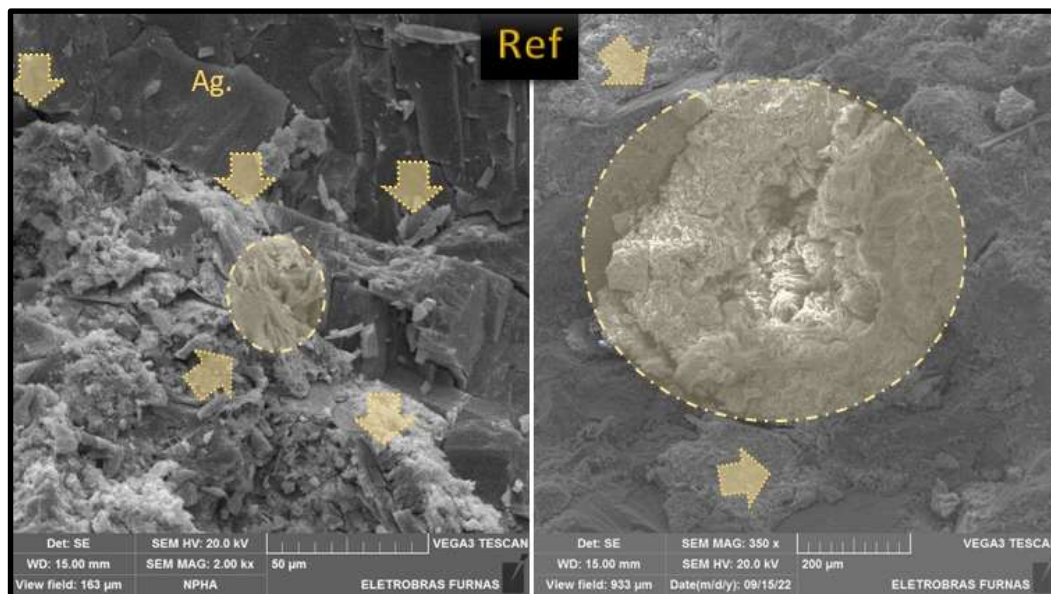


Figura 5 – Micrografias por MEV da amostra de REF.

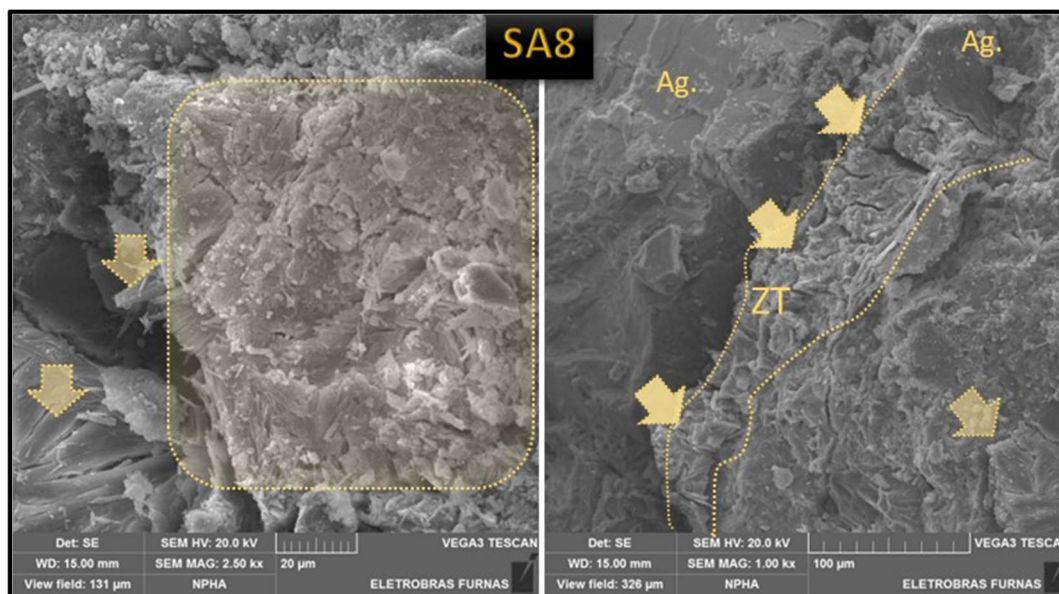


Figura 6 – Micrografias por MEV da amostra SA8.



Figura 7 – Micrografias por MEV da amostra SA12.

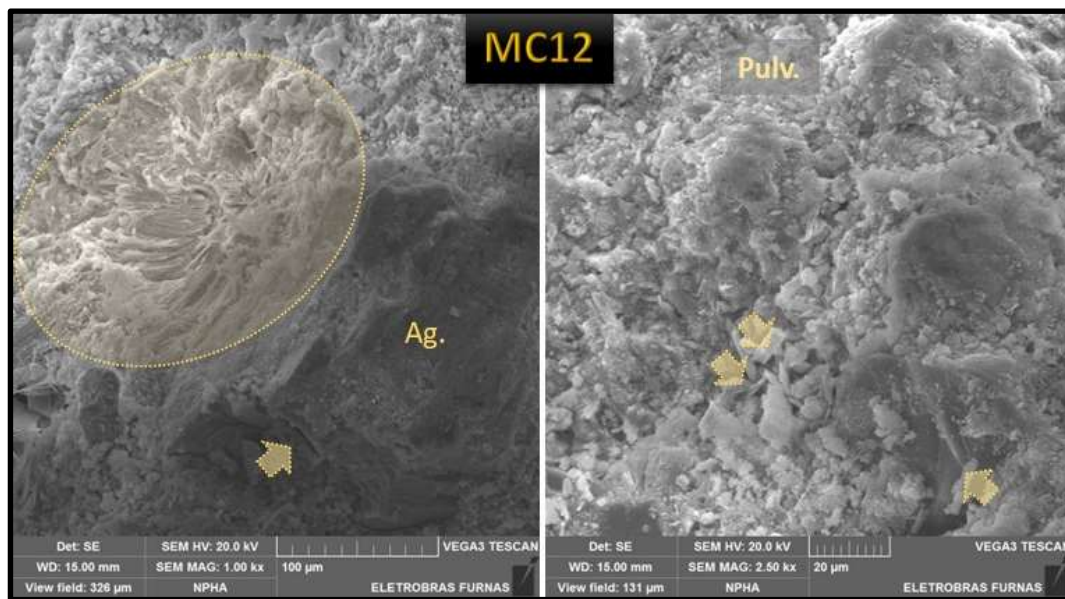


Figura 8 – Micrografias por MEV da amostra MC12.

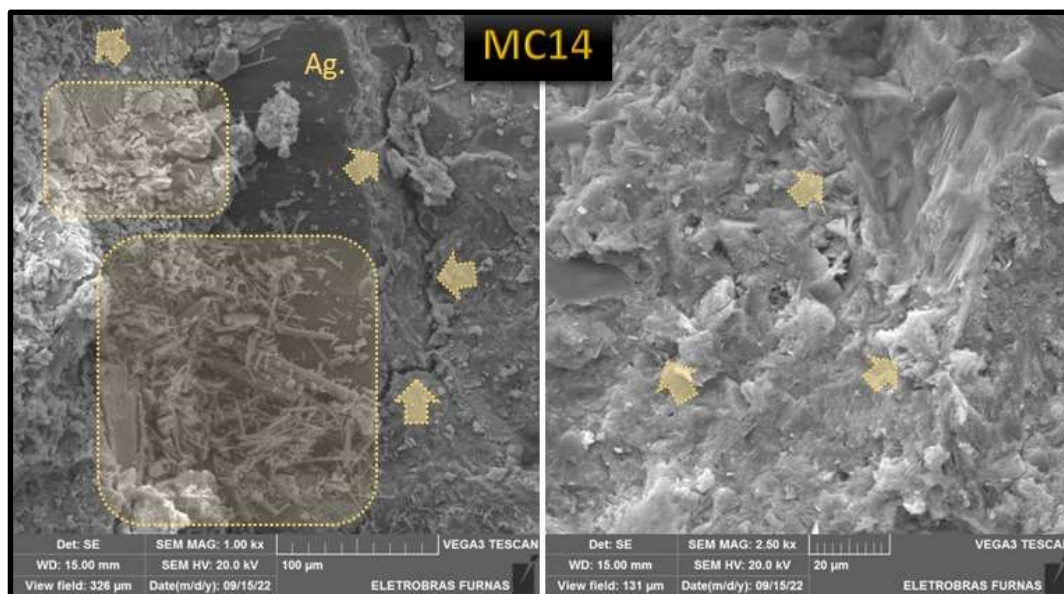


Figura 9 – Micrografias por MEV da amostra MC14.

Vale destacar que não apenas as formações do tipo “massivas” de etringita são as responsáveis pelas maiores expansões e deterioração mecânica, mas também a intensidade de ocorrência dessas neoformações, o que pôde ser visto durante as análises realizadas por microscopia eletrônica de varredura e coincidiu com as misturas sem adição e com menor teor de sílica ativa e metacaulim. Nos maiores teores empregados dessas adições, as ocorrências existem, mas devido ao atraso no desenvolvimento da DEF (SILVA, RIBEIRO; DIVET, 2022), não são ainda intensas além de terem sido verificados cristais mais aciculares.

Nas figuras a seguir são apresentados alguns espectros referentes às análises químicas elementares (microanálises) realizadas e que confirmaram a presença da etringita neoformada em decorrência de um ataque interno por sulfatos por DEF.

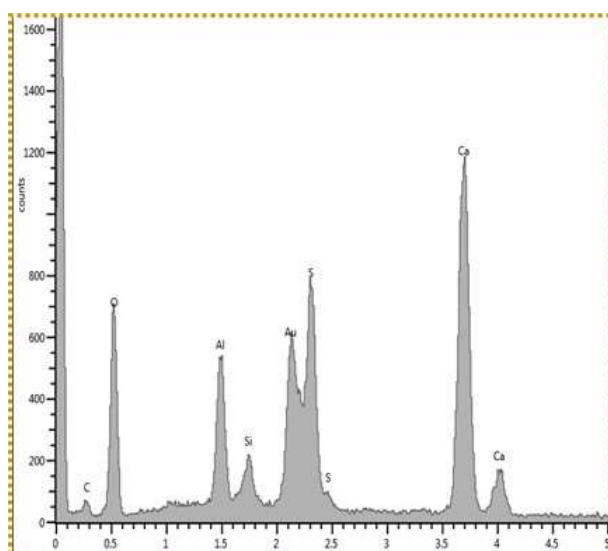


Figura 10 - Espectro característico da etringita (círculo) identificada na amostra de REF (Figura 5a).

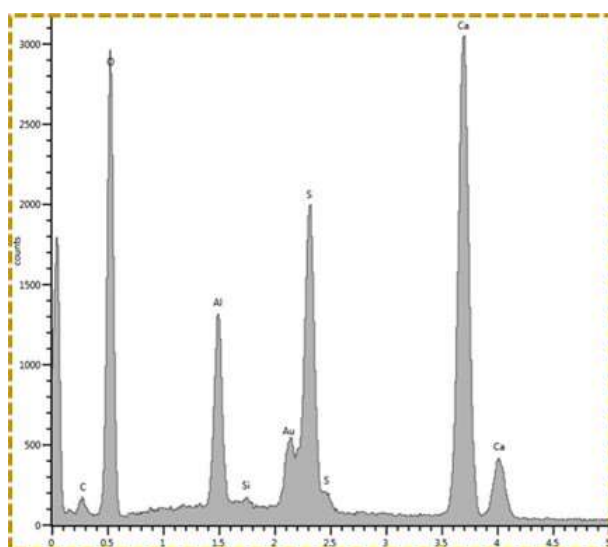


Figura 11 – Espectro característico da etringita (dentro do círculo) identificada na amostra de SA12 (Figura 7a)

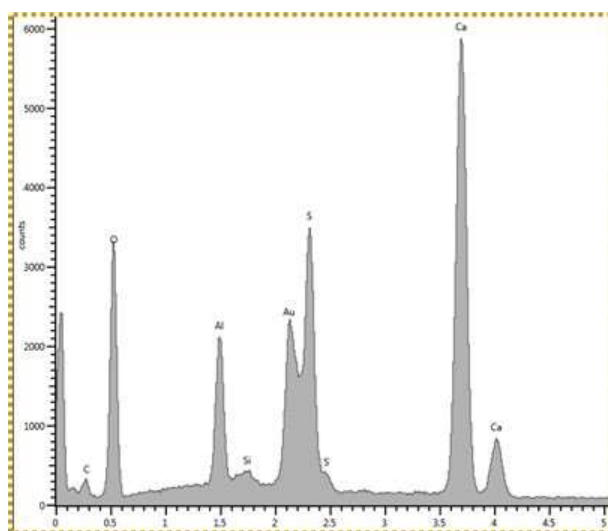


Figura 12 – Espectro característico da etringita (dentro do círculo) identificada na amostra de MC12 (Figura 8a)



4 Conclusões

Com base no estudo realizado e resultados obtidos, é possível concluir que existem diferenças no desenvolvimento do comportamento expansivo por DEF dos concretos em função do tipo e teor de adição empregados, ao longo do tempo.

A taxa de aceleração das expansões na presença de teores menores de adição, ou sem adição, foram maiores. Em ordem decrescente, as maiores expansões foram observadas para o concreto sem adições (REF.), seguido pelos concretos contendo a sílica ativa (em ambos os teores) e, por fim, aqueles concretos com metacaulim.

O nível de expansões alcançado na idade de 1 ano para a REF e SA8 foi bastante elevado, de 1% e 0,3%, respectivamente. O limite pelo método brasileiro adotado para considerar a ocorrência da DEF é de 0,04%. Em terceiro nível de expansão encontra-se a amostra SA12, que se situa nesse patamar. Os concretos avaliados com metacaulim não sinalizaram expansões acima de 0,04% até a idade avaliada, porém, deve-se destacar a necessidade do monitoramento do comportamento expansivo na presença de adições até a idade de 2 anos, conforme preconizado no método, para confirmar ou não o potencial expansivo da mistura em relação à DEF.

No que diz respeito ao comportamento mecânico, excetuando-se os concretos com metacaulim, os demais indicaram queda para a resistência à compressão ao longo do tempo, com reduções que se situaram entre 20 e 44% na idade de 1 ano, o que se justifica em decorrência dos danos ocasionados pela DEF.

O ensaio de ultrassom foi capaz, em idades mais avançadas, de se mostrar sensível à DEF haja vista a redução da velocidade de propagação de ondas, o que corrobora os ensaios mecânicos e se justifica pelas expansões atingidas.

Na presença das adições, e nos maiores teores empregados, notou-se apenas um atraso no desenvolvimento da DEF haja vista que a formação dos produtos se mostrou menos expressiva por meio das análises tanto visuais como microestruturais. Isso indica que, em idades posteriores o mesmo poderá ocorrer com essas amostras, quando as fases neoformadas, a partir da disponibilidade dos sulfatos na matriz, colmataram a maioria dos vazios e interfaces e gerarem tensões internas, refletindo em expansões e fissuração.

Diante do exposto, esse trabalho tem o intuito de registrar um alerta quanto à formação da etringita tardia (DEF) por temperatura, seja esta em decorrência de cura térmica ou pelo próprio calor de hidratação gerado: "As adições minerais pozolânicas" avaliadas, nos teores testados, não garantiram a completa mitigação das expansões e dos efeitos deletérios da DEF. Caso medidas preventivas não sejam adotadas antes do lançamento do concreto (limitação da temperatura de cura e refrigeração do concreto e seus materiais constituintes etc), a adoção apenas da incorporação de adições minerais pozolânicas pode não combater o fenômeno da DEF nos concretos ao longo do tempo, e a deterioração por um ataque interno por sulfatos é passível de ocorrer.



5 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15577-1**: Reatividade álcali-agregado. Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

BRONHOLO, J. L. Estudo do Ataque individual e misto de DEF e RAA e seus efeitos deletérios nas propriedades físico-químicas e mecânicas de concretos e argamassas de cimento Portland Pozzolânico e de alta resistência. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – LACTEC, Curitiba, 2020.

LANGOSKI, M.; TIECHER, F.; OLIVEIRA, S.; HASPARYK, N. Estudo da formação de etringita tardia (DEF) em laboratório, através de ensaios em argamassa, **62º Congresso Brasileiro do Concreto**. Florianópolis, IBRACON, 2020.

HASPARYK, N. P. Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado. **Tese (Doutorado)**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. p. 326, 2005.

HASPARYK, N.P. et al. Global analysis of DEF damage to concretes with and without fly-ash. **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 15, n. 3, 2022.

HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C. Deterioração do concreto por reações expansivas, **32 Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Salvador, CBDB, 2019.

HASPARYK, N. P.; SCHOVANZ, D.; KUPERMAN, S. Método de Ensaio para a Avaliação do Potencial de Ocorrência da Etringita Tardia (DEF) em Concreto. **Instrução Técnica ITGSTE004**. Ed. Furnas. Goiânia, 2020.

HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S.C. Reações expansivas deletérias no concreto. **Concreto e Construções**, v. 102, p. 60-66, 2021.

LEKLOU, N.; HUONG, V. N.; MOUNANGA, P. The effect of partial cement substitution with fly ash on delayed ettringite formation in heat-cured mortars. Korean Society of Civil Engineers. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2016.



MARTIN, R-P.; TOUTLEMONDE, F. Theoretical and experimental validation of a simple method to reproduce representative DEF-prone conditions in laboratory. **Materials and Structures**, v. 46, p. 1245 – 1255, 2013.

MARTIN, R.-P.; SANCHEZ, L.; FOURNIER, B.; TOUTLEMONDE, F. Diagnosis of AAR and DEF: Comparison of residual expansion, stiffness damage test and damage rating index, **15th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete (15th ICAAR)**, Ed. Bernardes, H.; Hasparyk, N.P. São Paulo, 2016.

MELO, S. K.; HASPARYK, N. P.; CARASEK, H.; MARTINS, C. Estudo da formação de etringita tardia. (DEF) em concreto de cimento Portland pozolânico por calor de hidratação, **52° Congresso Brasileiro do Concreto**. Fortaleza, IBRACON, 2010.

MELO, S. K. ; HASPARYK, N. P.; CARASEK, H.; SILVA, H. H. A. B.; MARTINS, C. Influência do calor de hidratação na formação da etringita tardia (DEF) em concreto de cimento Portland pozolânico, **53° Congresso Brasileiro do Concreto**. Florianópolis, IBRACON, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. HASPARYK, N. P. (Ed.). São Paulo: IBRACON, 2014.

OLIVEIRA, S. Avaliação do potencial mitigador da sílica ativa e do metacaulim frente à formação de etringita tardia – DEF - em concretos. **Dissertação** (Mestrado). Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2022.

PORTELLA, K.F.; HASPARYK, N.P.; Bragança, M.O.G.P.; BRONHOLO, J.L. Dias, B.G.; LAGOIRO, L.E. Multiple techniques of microstructural characterization of DEF: Case of study with high early strength Portland cement composites. **Construction and Building Materials**, 311, 2021.

RASHIDI, M.; PAUL, A.; KIM, J-Y.; JACOBS, L. J.; KURTIS, K.E. Cement and Concrete Research Insights into delayed ettringite formation damage through acoustic nonlinearity. **Cement and Concrete Research**, v. 95, p. 1–8, 2017.

SCHOVANZ, D. Estudo da formação da etringita tardia (DEF) em concretos com cimento Portland pozolânico e de alta resistência. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade Meridional, Passo Fundo, 2019.

SILVA, A.S.; RIBEIRO, A.B.; DIVET, L. Prevention of internal sulphate reaction in concrete. Long-term results of the effect of mineral additions. **16th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete (16th ICAAR)**. Lisboa, Portugal, p. 458-467, 2021.

TORRES, I. F.; ANDRADE, T. Análise de risco da formação de etringita tardia em blocos de fundação na Região Metropolitana de Recife/PE-Brasil. **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, IBRACON, v. 9, n. 3, 2016.